



## Étude de la formabilité des tôles hydroformées dans la gamme des vitesses de déformation intermédiaires

Cunsheng Zhang, Lionel Leotoing, Dominique Guines, Eric Ragneau

### ► To cite this version:

Cunsheng Zhang, Lionel Leotoing, Dominique Guines, Eric Ragneau. Étude de la formabilité des tôles hydroformées dans la gamme des vitesses de déformation intermédiaires. 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. pp.1-6. hal-01030828

**HAL Id: hal-01030828**

**<https://hal.science/hal-01030828>**

Submitted on 22 Jul 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Étude de la formabilité des tôles hydroformées dans la gamme des vitesses de déformation intermédiaires

Cunsheng ZHANG, Lionel LEOTOING, Dominique GUINES, Eric RAGNEAU

Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique - INSA de Rennes  
20, avenue des Buttes de Coësmes - 35043 Rennes Cedex  
[lionel.leotoing@insa-rennes.fr](mailto:lionel.leotoing@insa-rennes.fr)

## Résumé :

*Les développements récents de procédés innovants pour la mise en forme des tôles (Hydroformage, formage incrémental,...) exigent de bien caractériser la formabilité de ces matériaux et notamment leur sensibilité vis à vis des vitesses de déformation observées lors de leur mise en oeuvre. Malgré quelques défauts, les courbes limites de formage (CLF) restent des outils très utilisés pour évaluer la formabilité des métaux en feuilles. L'objectif de ce travail est de mettre en évidence l'influence de la vitesse de déformation (dans la gamme des vitesses de déformation intermédiaires) sur le niveau et la forme des CLF par deux approches différentes. La première approche est théorique, deux modèles d'apparition de la striction (modèle MK et méthode de perturbation) sont évalués et comparés. Dans la deuxième approche, le test de Marciniak a été simulé par éléments-finis et les CLF ont été tracées à partir du choix d'un critère d'apparition d'instabilités plastiques.*

## Abstract :

*Recent innovative developments for sheet metal forming (Hydroforming, incremental forming,...) require a good characterization of the formability of these materials and in particular the influence of strain rate on the formability. In spite of some defects, the forming limit diagrams (FLDs) remain useful tools to evaluate the formability of sheets. In this paper, our objective is to underline the strain rate influence (in the intermediate range of strain rates) on the level and the shape of FLDs by two different approaches. The first one is theoretical, two necking models (the M-K model and the perturbation method) have been evaluated and compared. In the second approach, the Marciniak test has been simulated with a finite element code and the FLDs have been plotted from the choice of a plastic instabilities occurrence criterion.*

## Mots-clefs :

**Courbes limites de formage; Test de Marciniak; Sensibilité à la vitesse de déformation**

## 1 Introduction

Le procédé d'hydroformage trouve un nombre croissant d'applications industrielles et plus spécifiquement dans les secteurs de l'automobile et de l'aéronautique. La mise en oeuvre de ce procédé peut s'avérer délicate compte tenu des différents défauts rencontrés : déchirement de la tôle, apparition d'instabilités locales (wrinkling) ou globales, .... L'apparition du premier type de défaut peut être évitée grâce à l'utilisation des Courbes Limites de Formage (CLF). Le concept de CLF est introduit par Keeler et Backofen (1963) pour prédire la limite supérieure de formage de la tôle avant l'apparition de la striction. Les CLF (FIG.1) sont généralement

déterminées à partir d'essais sur des éprouvettes de différentes formes afin de couvrir l'ensemble du domaine des déformations.

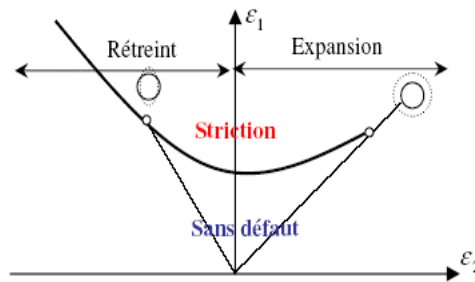


FIG. 1 – Une représentation type de CLF

Malgré quelques défauts, les CLF sont des outils très utilisés pour toutes les applications liées au formage des tôles. Le premier défaut est qu'il n'existe pas réellement de normes associées à la caractérisation des CLF, excepté la norme ISO 12004 qualifiée de trop vague par de nombreux spécialistes. Le deuxième défaut majeur réside dans la dépendance des CLF vis à vis des chemins de déformation. Ce caractère rend difficile et douteuse leur utilisation pour l'analyse de procédés de formage complexe, comme l'hydroformage par exemple. Ainsi, des nouvelles représentations ont été présentées afin de limiter cette dépendance. Arrieux et al. (1990) ont proposé une solution basée sur une représentation dans l'espace des contraintes. Ferron et al. (1998) ont tracé l'évolution de la déformation équivalente en fonction du rapport des vitesses de déformation.

Enfin, peu de travaux ont été consacrés à l'influence des vitesses de déformation sur les CLF. Pourtant, il est admis que le niveau des vitesses de déformation peut jouer un rôle considérable sur la formabilité des tôles et notamment sur l'apparition de la striction en changeant le niveau et la forme des CLF (Laukonis et al. (1978), Percy (1980)). Quelques modèles théoriques, prenant en compte la sensibilité à la vitesse de déformation, ont été établis mais ils restent fortement sensibles aux modèles viscoplastiques choisis, sans réellement aboutir à des critères explicites (Ben Tahar (2005)). D'un point de vue expérimental, peu de tests dynamiques existent et les approches théoriques souffrent du manque de bases expérimentales fiables.

Ainsi, les CLF sont encore aujourd'hui l'objet d'importants travaux de recherche et plus spécialement sur leur détermination expérimentale, leur représentation ou encore leur sensibilité aux vitesses de déformation. Le travail présenté ci-dessous a pour objectif de comparer les effets de la vitesse de déformation sur le niveau et la forme de CLF obtenues d'une part de manière théorique (modèle MK et méthode de perturbation) et d'autre part numériquement grâce à une simulation par éléments-finis du test de Marciniak.

## 2 Modèles théoriques

### 2.1 Modèle MK (Marciniak et Kuczynski)

Marciniak et Kuczynski (1967) basent leur approche sur la présence d'un défaut initial conduisant à l'apparition d'une striction localisée. Ce défaut est supposé orienté suivant la direction perpendiculaire à la contrainte principale majeure. Plus récemment, Ferron et al. (1998) ont proposé les expressions suivantes pour les domaines en rétreint (1) et en expansion (2):

$$\varepsilon_1 = \frac{2+\beta}{2g\sqrt{1+\beta+\beta^2}} \left\{ n - \sqrt{2fn} + \left[ m + \frac{5\beta^2}{(2+\beta)^2} (P^2 - 1) \right] \ln(1/f) \right\} \quad (\text{pour } \beta < 0) \quad (1)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sqrt{1+(2R/1+R)\beta+\beta^2}}{g(1+\beta)} \left\{ n - \sqrt{2fn} + m \ln(1/f) \right\} \quad (\text{pour } \beta > 0) \quad (2)$$

$\varepsilon_1$  représente la déformation principale majeure,  $\beta = d\varepsilon_2 / d\varepsilon_1$ ,  $g = d\varepsilon_1 / d\bar{\varepsilon}$ ,  $P$  le rapport entre les contraintes d'écoulement en traction plane et en traction équiaxiale,  $R$  le coefficient de Lankford et  $f$  le défaut initial.

La détermination des expressions précédentes suppose une loi d'écrouissage de type puissance :

$$\sigma = K \bar{\varepsilon}^n \dot{\bar{\varepsilon}}^m \quad (3)$$

dans laquelle  $\sigma$  est la contrainte équivalente,  $\bar{\varepsilon}$  la déformation équivalente,  $K$  et  $n$  les constantes d'écrouissage du matériau et  $m$  le coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation. Pour l'alliage d'aluminium utilisé dans cette étude,  $K=500$  MPa et  $n=0,34$ .

Il reste à fixer la valeur du défaut initial  $f$ , celui-ci sera fixé dans un premier temps à la valeur habituellement rencontrée dans la littérature (Ferron et al. (1998)) ( $f=0,0025$ ,  $R=1$  et  $P=1,154$ ). La CLF obtenue par ce modèle est présentée FIG.2 pour différentes valeurs de  $m$ .

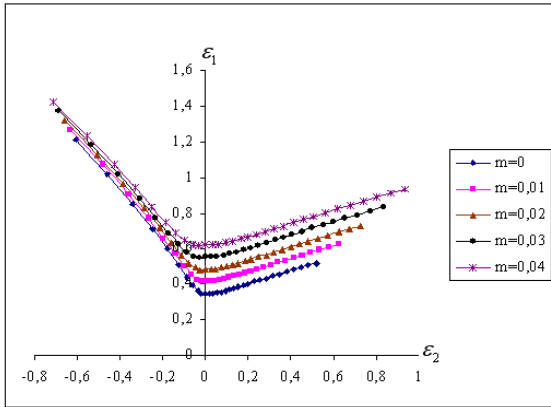


FIG. 2 – CLF déterminée par le modèle MK

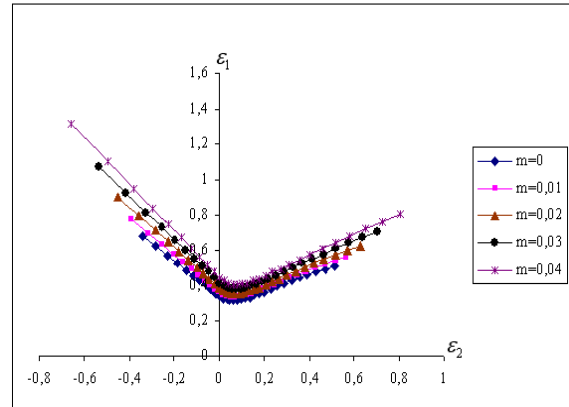


FIG.3 – CLF déterminée par la méthode de perturbation

## 2.2 Méthode de Perturbation

La méthode de perturbation a été introduite par Dudzinski and Molinari (1988). En utilisant une loi d'écrouissage identique au modèle précédent (3), la méthode de perturbation conduit aux expressions suivantes (Li et al (1999)).

$$\varepsilon_1 = \frac{n}{1+\beta-\xi m} \quad (\text{pour } \beta < 0) \quad (4)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{n(2+\beta)^2}{4(1+\beta+\beta^2)(1+\beta)-\xi[3\beta^2+m(2+\beta)^2]} \quad (\text{pour } \beta > 0) \quad (5)$$

avec  $\xi = 6,0$ . Les CLF déterminées par cette méthode sont présentées FIG.3.

Les FIG.2 et FIG.3 montrent clairement l'influence de  $m$  sur le niveau et la forme des CLF théoriques. Notons que pour le modèle MK, la sensibilité vis à vis de la vitesse est d'avantage marquée dans le domaine de l'expansion.

### 3 Approche numérique

La méthode des éléments finis est de plus en plus utilisée pour prédire numériquement les CLF grâce notamment à la modélisation des tests de Nakazima et de Marciniak. Pour le test de Nakazima, Brun et al. (1999) ont suivi la déformation dans l'épaisseur des tôles afin de déterminer le début de la striction. Quelques années plus tard, avec le test de Marciniak, Alès Petek et al. (2005) ont utilisé la première et la seconde dérivée temporelle de la déformation dans l'épaisseur pour suivre l'apparition de la striction. Dans notre étude, le test de Marciniak sera également modélisé mais en introduisant la loi d'écrouissage définie par l'expression (3).

#### 3.1 Modèle numérique

Le modèle numérique est composé de trois éléments : un poinçon cylindrique à fond plat, une matrice et la tôle. Le serrage de la tôle sur la matrice est assuré par la mise en place d'une pression directement appliquée sur la tôle (FIG.4).

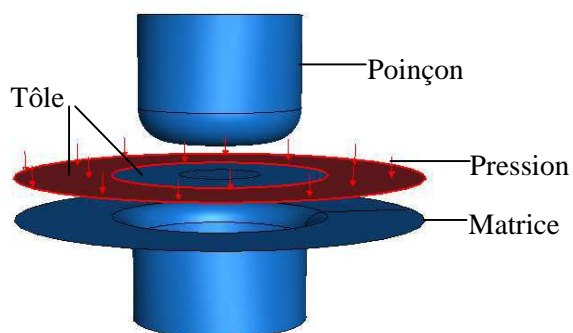


FIG.4 – Modèle du test de Marciniak

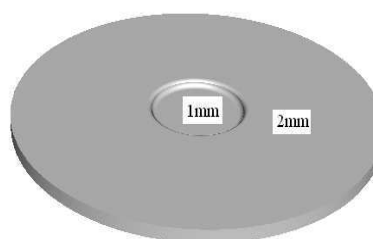


FIG.5 – Tôle avec épaisseur variable

Pour assurer une localisation des déformations au niveau de la partie centrale de la tôle, les éprouvettes comportent une zone centrale d'épaisseur réduite (1mm) par rapport à l'épaisseur de 2mm sur le reste de l'éprouvette (FIG.5). Pour couvrir les domaines d'expansion et de rétreint, différentes géométries d'éprouvettes doivent être testées (FIG.6 et TAB.1).

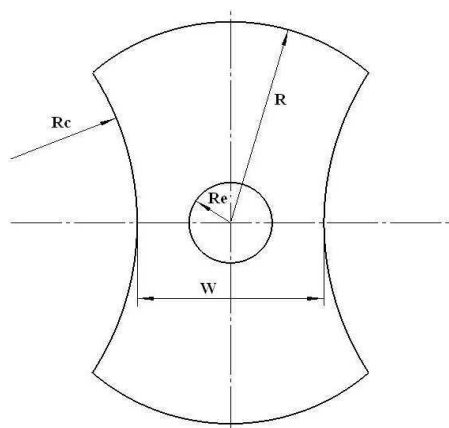


FIG.6 – Géométrie des éprouvettes

TAB.1 – Dimensions des éprouvettes

Numéro des éprouvettes	1	2	3	4	5	6	7
W(mm)	10	30	40	45	48	50	53
R(mm)	50						
Rc(mm)	70						
Re(mm)	10						

L'analyse est menée sous ABAQUS avec des éléments de type coque (S4R). En raison de la symétrie du problème, seul le quart du modèle est retenu. Le comportement du matériau constitutif de la tôle est supposé isotrope. Pour la partie élastique, le module d'Young est fixé à 70000 MPa et le coefficient de Poisson à 0,3. La loi d'écrouissage (3) est prise en compte sous ABAQUS grâce à la subroutine UHARD. Le frottement est de type Coulomb avec un coefficient de 0,1 pour l'interface poinçon-tôle et de 0,3 pour l'interface tôle-matrice. La vitesse du poinçon lors de l'essai est de 5 m/s.

### 3.2 Résultats

La striction localisée étant une instabilité plastique dont la taille est de l'ordre de grandeur de l'épaisseur de la tôle, le suivi de la déformation dans l'épaisseur doit permettre d'observer l'apparition de la striction. En effet, lorsque celle-ci se produit, on note une évolution brutale de la déformation dans l'épaisseur qui se traduit par l'existence très nette d'un point de bifurcation sur le tracé de cette déformation au centre de la tôle (FIG.8). Après l'apparition de la striction, l'amincissement est bien localisé au centre de la tôle alors que le niveau des déformations reste constant dans les autres éléments adjacents (FIG.7).

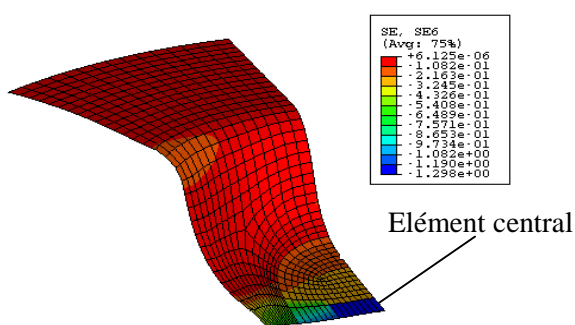


FIG.7 – Distribution de la déformation dans l'épaisseur pour l'éprouvette numéro 2 (TAB.1)

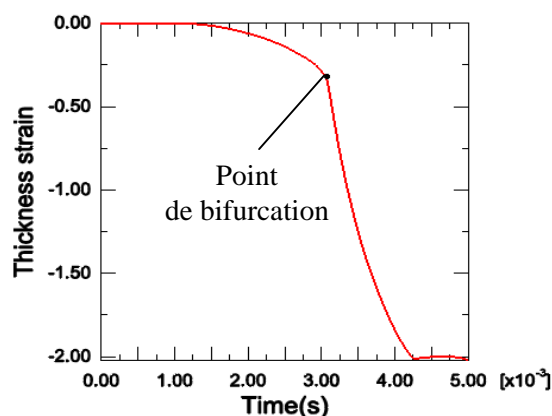


FIG.8 – Evolution de la déformation dans l'épaisseur de l'élément central

Ainsi, d'après le critère précédent, le début de la striction est déterminé pour chaque forme d'éprouvette puis reporté sur le diagramme limite de formage. La figure 9 montre les CLF obtenues pour différentes valeurs de  $m$ .

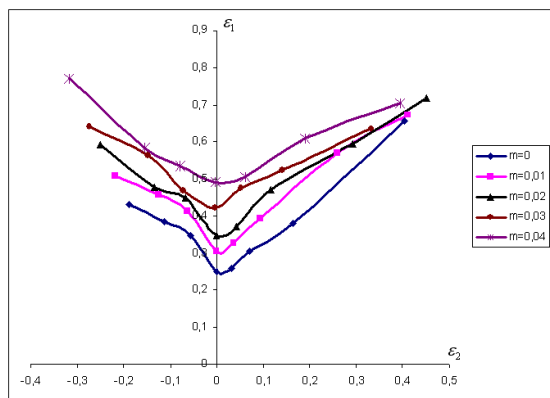


FIG.9 – CLF numériques



FIG.10 – Montage expérimental du test de Marciniak

Comme pour les modèles théoriques, ces résultats numériques montrent également une sensibilité importante vis à vis de la vitesse de déformation. Plus le paramètre  $m$  de sensibilité à la vitesse est élevé et plus la formabilité du matériau augmente. La corrélation entre le modèle numérique et les deux modèles théoriques pourrait être améliorée en ajustant les paramètres  $f$  pour le modèle MK et  $\xi$  pour la méthode de perturbation.

#### 4 Approche expérimentale

Une base expérimentale s'avère donc indispensable pour valider ces modèles. Un essai de Marciniak, installé sur une presse servo-hydraulique dynamique, est en cours de développement (FIG.10). Lors de ces essais, la vitesse de déplacement du poinçon atteint 5m/s. Les vitesses de déformation correspondantes sont comprises dans la gamme des vitesses intermédiaires (entre 10 et 500  $s^{-1}$ ), rencontrées lors des procédés de type hydroformage ou emboutissage. Le suivi des déformations est réalisé grâce à une caméra rapide.

#### 5 Conclusion

D'après ces premiers résultats numériques et théoriques, le tracé des CLF est fortement influencé par le niveau des vitesses de déformation mises en jeu. Quelque soit l'approche, la formabilité du matériau est considérablement améliorée avec une augmentation de la sensibilité à la vitesse de déformation (paramètre  $m$ ). Ne pas tenir compte de ce paramètre dans la détermination des CLF revient donc à accentuer fortement le caractère conservateur de ces outils. Ainsi, une détermination plus précise des CLF conduira à optimiser un peu plus les différents procédés de mise en forme des tôles.

#### Références:

- Arrieux, R., 1990 Détermination théorique et expérimentale des courbes limites de formage en contraintes. PHD thesis, Insa de Lyon, France.
- Ben Tahar, Mehdi. 2005 Contribution à l'étude et la simulation du procédé d'hydroformage. PHD thesis, Ecole des Mines de Paris, France.
- Brun, R., Chambard, A. 1999 Actual and virtual testing techniques for a numerical definition of materials. Proc. NUMISHEET'99, 393-398. Besançon, France.
- Keeler, S.P., Backofen, W.A. 1963 Trans. ASM. **56**, 25-48
- Laukonis, J.V., Ghosh, A.K. 1978 Effects of Strain Path Changes on The Formability of Sheet Metals. Metall. Trans. 9A, 1849-1856
- Li, M.Y., Chandra, A. 1999 Influence of strain-rate sensitivity on necking and instability in sheet metal forming. Journal of material processing technology. 96, 133-138
- Marciniak, Z., Kuczynski, K. 1967 Limit strains in the processes stretch-forming sheet metal. International journal of mechanical sciences. 9, 609-620
- Mesrar, R., Fromentin, S., Makkouk, R., Martiny, M., Ferron, G\*. 1998 Limits to ductility of metal sheets subjected to complex strain-paths. International journal of plasticity. 14, 391-411
- Percy, J.H. 1980 The effect of strain rate on the FLD for sheet metal. Annals of the CIRP vol.29,151-152
- Petek, A., Pepelnjak, Tomaz., Kuzman, Karl. 2005 An improved Method for Determining a FLD in the Digital Environment. Journal of Mechanical Engineering. 51,330-345
- Toth, L.S., Dudzinski, D., Molinari, A. 1996 Forming limit predictions with the perturbation method using stress potential functions of polycrystal viscoplasticity. International journal of mechanical sciences .38, 805-824